

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ АВТОНОМНОГО ПИТАНИЯ С СИНХРОННЫМ РЕАКТИВНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Казакбаев В.М., Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Сафин Н.Р.
Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия, emf2010@mail.ru

Аннотация – В работе рассматривается модель автономной инверторной генераторной установки малой мощности с двигателем внутреннего сгорания и синхронным реактивным генератором. С помощью данной модели энергетические свойства рассматриваемой установки могут быть рассчитаны с учетом всех основных типов потерь в двигателе и генераторе. Модель также позволяет расчет динамики электрических процессов в цепях генератора и инвертора. Описанный подход может быть легко распространен для моделирования и расчета характеристик инверторного генератора с другими типами электрических машин.

Ключевые слова – бензогенератор, бесщеточный генератор, моделирование, синхронная реактивная машина, энергоэффективность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электроснабжение объектов, не подключенных к центральной электроэнергетической системе, часто осуществляется посредством генераторных установок с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) [1], [2]. Такие генераторные установки (ГУ) находят широкое применение в качестве основных и резервных источников питания, поскольку отвечают требованиям надежности, долговечности, большого ресурса работы, сравнительно низких капитальных затрат, компактности, легкости монтажа и обслуживания [2].

В последние годы цены на природное топливо (газ, бензин и дизельное топливо) непрерывно увеличиваются. К тому же топливо, необходимое для обеспечения работы автономных объектов, часто привозится из удаленных районов. Так что его стоимость еще увеличивается за счет транспортных расходов. В результате в рассматриваемом приложении экономия топлива становится крайне актуальной. Кроме того, важной остается проблема снижения вредных выбросов при работе ГУ, особенно в случае установок резервного питания, работающих в черте города.

Вышеназванные проблемы могут быть в значительной мере решены с помощью применения ГУ с электронным преобразователем частоты (ПЧ) (т.н. “инверторные генераторы”) [1]. За счет возможности оптимизации работы своих агрегатов такие ГУ при той же мощности потенциально обладают меньшими потреблением топлива и вредными выбросами. Одной из возможностей оптимизации является регулирование скорости вращения генератора [2].

В случае непосредственного подключения генератора к нагрузке, без промежуточного ПЧ, скорость вращения n и напряжение на выходе генератора U должны поддерживаться постоянными. В инверторном генераторе ПЧ преобразует напряжение генератора переменной амплитуды и частоты в трехфазное или однофазное напряжение с требуемыми постоянными величинами амплитуды и частоты. Задание частоты вращения вала ГУ в этом случае определяется на основании измеренных параметров электрической нагрузки (например, нагрузочного тока) [2].

Регулирование скорости вращения позволяет существенно снизить потребление топлива, шум и вибрации при работе ГУ с пониженной нагрузкой, а также повысить эксплуатационный ресурс. Вместе с улучшением показателей качества питающего напряжения [1], это позволяет оправдать удорожание инверторного ГУ из-за наличия силового электронного преобразователя и более сложной системы управления.

Возможность проектирования инверторного ГУ с повышенной частотой вращения также позволяет уменьшить момент на валу агрегата и снизить габариты генератора и первичного двигателя.

Конструкция ГУ с переменной скоростью вращения позволяет применение в качестве генератора электрических машин, не имеющих щеточных контактов и обмоток на роторе.

Перспективным для рассматриваемого приложения является применение в качестве генератора синхронной реактивной машины (СРМ) улучшенной конструкции. От традиционной конструкции СРМ с явновыраженными полюсами машина улучшенной конструкции отличается, в первую очередь, применением ротора с повышенной магнитной анизотропией. Чаще всего в конструкции таких СРМ применяют ротор немагнитными промежутками (“flux-barrier rotor”) [3].

СРМ имеет надежную долговечную конструкцию без постоянных магнитов и обмоток на роторе. Конструкция трехфазной СРМ в максимальной степени унифицирована с конструкцией традиционной трехфазной асинхронной машины (АМ). В сравнении с АМ, СРМ может обладать значительно улучшенными КПД и сниженными массо-габаритными характеристиками [3].

В данной работе рассматривается модель инверторной бензо-генераторной установки малой

мощности с синхронным реактивным генератором. Такая модель позволяет оценить энергетические и другие рабочие свойства СРМ в различных режимах работы ГУ.

II. МОДЕЛЬ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ С СИНХРОННЫМ РЕАКТИВНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

В данном разделе описана математическая модель инверторной генераторной установки с синхронным реактивным генератором (СРГ) и двигателем внутреннего сгорания (ДВС). В качестве среды для моделирования используются библиотеки пакета Matlab: Simulink и SimPowerSystems. Рис. 1 показывает блок-схему моделируемой системы.

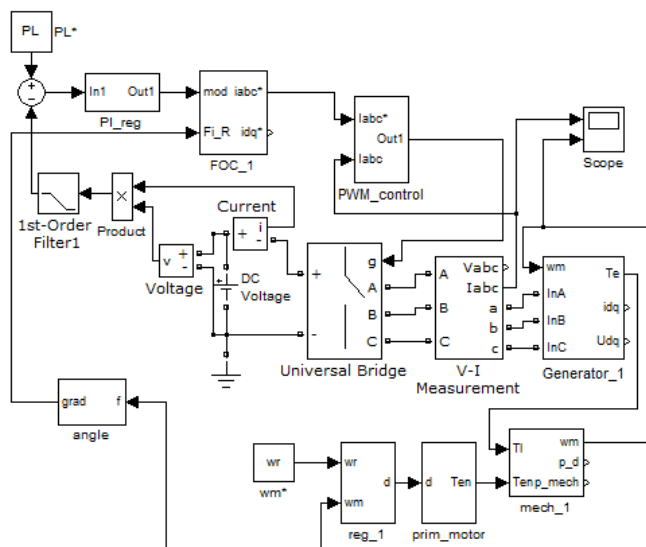


Рис.1. Схема модели ГУ.

Блок “mech_1” задает уравнение механического равновесия системы:

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_E - T_G - T_{EL} - T_{EG}, \quad (1)$$

где J – момент инерции на валу ГУ; ω_m – механическая частота вращения; T_E – момент, создаваемый ДВС, без учета потерь в ДВС; T_G – момент СРГ без учета механических потерь с СРГ; T_{EL} – момент потерь мощности в ДВС; T_{GL} – момент механических потерь в СРГ.

Блок “prim_motor” описывает модель ДВС. Бензиновый ДВС с номинальными величинами 1,5 кВт, 3000 об/мин моделируется упрощенно [1]. Предельная нагрузка бензинового двигателя ограничивается моментом, достигаемым при предельном угле отпирания дроссельной заслонки, то есть при максимальной подаче горючей смеси. Максимальный момент ДВС был принят равным $T_{e \max} = 5$ Н·м.

Крутящий момент ДВС рассчитывается как:

$$T_E = m_0 + m_1 \cdot d, \quad (2)$$

где d – расход топлива на 1 оборот ДВС; $m_0 = \text{const}$; $m_1 = \text{const}$.

Момент потерь мощности в ДВС рассчитываются как:

$$T_{EL} = r_0 + r_1 \cdot \omega_m, \quad (3)$$

где $r_0 = \text{const}$; $r_1 = \text{const}$

Коэффициенты m_0 , m_1 , r_0 и r_1 и могут быть определены из паспортных характеристик ДВС [1].

Блок “reg_1” задает ПИ регулятор расхода d , управляемый ошибкой по величине ω_m .

Блок “Generator_1” задает модель СРМ, более подробно описанную в [3]. Для данного расчета приняты постоянные величины индуктивностей L_d и L_q . Параметры модели СРМ (Таблица 1), принятые для расчета соответствуют параметрам номинального режима одного из опытных образцов (0,75 кВт с возможностью длительной перегрузки до 1,1 кВт, 3000 об/мин), описанных ранее [3].

Таблица 1

Параметры СРМ

Параметр	Величина
L_d , Гн	0.16
L_q , Гн	0.028
R , Ом	3
R_c (100 Гц, 3000 об/мин), Ом	2225
p_{mech} (3000 об/мин), Вт	29,5

В таблице 1 приняты следующие обозначения. R – фазное активное сопротивление обмотки статора; R_c – сопротивление магнитных потерь; $p_{\text{mech}} = T_{EG} \cdot \omega_m$ – величина механических потерь.

Изменение параметра R_c при изменении частоты питания f учитывается как [4]:

$$R_c = R_{c0} \cdot \left(\frac{f_0}{f} \right)^{1.5}, \quad (4)$$

где R_{c0} – величина при 100 Гц; $f_0 = 100$ Гц.

Учет изменения T_{EG} от ω_m осуществляется с помощью линейной аппроксимации, подобно (3).

В модели представлено только одно звено двухзвенного ПЧ, подключенное к генератору. Звено, подключенное к нагрузке, с целью снижения времени расчета не моделируется. Трехфазный двухуровневый инвертор с идеальными ключами моделируется с помощью стандартного блока “Universal Bridge” из библиотеки “SimPowerSystems”.

Для возможности раздельного управления магнитным потоком и вращающим моментом двигателей без обмотки возбуждения и постоянных магнитов (в том числе СРМ и АМ) необходимо применение векторной системы управления.

Система управления (СУ) СРГ в модели состоит из блоков “FOC control” и “PWM control”. Блок “FOC control” реализует алгоритм векторного управления СРГ с постоянством электрического угла между осью d вектором тока статора [3], [4]. С целью снижения расчетного времени ШИМ контроллер (блок “PWM control”) моделируется упрощенно (управление ключами инвертора по принципу «токового коридора»). На вход СУ получает сигналы фактических значений фазных токов двигателя и угла положения ротора. На выходе СУ формируются сигналы управления ключами инвертора. Блок “angle” вычисляет фактический угол положения ротора с помощью интегрирования скорости двигателя.

Для достижения определенного значения мощности нагрузки P_L амплитуда тока СРГ регулируется с помощью ПИ регулятора (блок "PI_reg"). Заданием для этого регулятора является сигнал ошибки по активной мощности в цепи постоянного тока инвертора. Для устранения влияния модуляционной составляющей тока данный сигнал также обрабатывается фильтром низкой частоты.

Количество потребляемого топлива S_h пропорционально сумме полезной мощности и всех потерь в ГУ [1]:

$$S_h = \frac{k_1}{m_1} \cdot (P_L + P_E + P_G) \cdot h, \quad (5)$$

где $k_1 = 3600/(1000 \cdot 4\pi) = 0,2866$; h - количество часов работы при данной мощности; P_L - полезная электрическая мощность; P_E - потери мощности в ДВС; P_G - потери мощности в СРГ.

Потери в инверторе в рассматриваемой модели не учитываются.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для расчета потребления топлива была рассмотрена ГУ с номинальной (максимальной длительной) мощностью 1200 Вт. Был принят четырехчасовой цикл работы ГУ с величинами почасовой нагрузки: 200 Вт, 500 Вт, и 800 Вт, 1200 Вт, типичный для рассматриваемого приложения.

Регулирование скорости ГУ может осуществляться исходя из различных принципов [1], [2]. Отметим, что поскольку минимальная устойчивая скорость карбюраторного двигателя составляет 1000-1200 об/мин [2], минимально допустимая величина n в модели принята равной $n_{\min} = 1000$ об/мин. При расчете был принят закон регулирования, обеспечивающий величину $T_e = T_{e \max}$ во всех случаях, когда $n > n_{\min}$. Отметим, что реализация этого закона не требует знания параметров системы, кроме n_{\min} и $T_{e \max}$.

Таблица 1 показывает результаты расчета для случая постоянной скорости $n = 3000$ об/мин. Таблица 2 показывает результаты для ГУ с теми же параметрами при регулировании скорости n , как описано выше.

В рассматриваемом рабочем цикле усредненное значение потребления топлива составило 315 грамм/ч при постоянной скорости (по данным таблицы 2) и 246 грамм/ч без регулирования скорости (по данным таблицы 3). Разница в потреблении топлива составила около 22 %.

Потери энергии в ГУ в режимах с нагрузкой ниже номинала также существенно снижаются (до 54 % в режиме с нагрузкой 200 Вт)

Следует отметить, что помимо снижения потребления топлива при работе ГУ с пониженной скоростью, будут также снижены шум и вибрации, вредные выбросы и износ вращающихся частей.

Таблица 2

Результаты расчета потерь и потребления топлива ГУ при постоянной скорости вращения

Мощность нагрузки P_L, Вт	200	500	800	1200
Частота вращения n, об/мин	3000	3000	3000	3000
Мощность потерь в ДВС P_E, Вт	188	188	188	188
Мощность потерь в генераторе P_G, Вт	58	98	137	190
Суммарная мощность потерь ГУ ($P_E + P_G$), Вт	246	286	326	378
Расход топлива S_h, грамм/ч	143	252	360	506

Таблица 3

Результаты расчета потерь и потребления топлива ГУ при переменной скорости вращения

Мощность нагрузки P_L, Вт	200	500	800	1200
Частота вращения n, об/мин	1000	1346	2036	3000
Мощность потерь в ДВС P_E, Вт	39	56	101	188
Мощность потерь в генераторе P_G, Вт	79	130	144	190
Суммарная мощность потерь ГУ ($P_E + P_G$), Вт	118	186	245	378
Расход топлива S_h, грамм/ч	64	160	256	506

IV. ВЫВОДЫ

В работе представлена модель автономной инверторной генераторной установки малой мощности с бензиновым двигателем и синхронным реактивным генератором. Рассмотрен подход к моделированию СРГ в комплексе с электронным преобразователем и первичным двигателем.

Описанный подход может быть легко распространен для моделирования и расчета характеристик инверторного генератора с другими типами электрических машин.

Рассмотрены источники потерь энергии в инверторном генераторе с СРГ и ДВС. Предложен простой подход к регулированию скорости ГУ с целью снижения потребления топлива, не требующий детального знания параметров системы. Согласно представленным расчетам, в рассматриваемом случае предложенный подход позволяет снизить потребление

топлива на 22 %, в сравнение со случаем ГУ с теми же параметрами без регулирования скорости.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Leuchter, P. Bauer, V. Rerucha, V. Hajek, “Dynamic Behavior Modeling and Verification of Advanced Electrical-Generator Set Concept”, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No.1, pp. 266-279, January 2009.
- [2] Завалишин В.В., Экономия топлива при генерации электроэнергии дизель-генераторной установкой с переменной частотой вращения дизеля / В.В. Завалишин // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2014. - № 3(46). - С. 128-135.
- [3] V. Kazakbaev, V. Prakht, V. Dmitrievskii, D. Askerov, “Calculation and Experimental Study on Iron Loss of Converter-Fed Synchronous Reluctance Motor for Indirect Efficiency Determination”, in Proceedings of The International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2017), pp. 1-6, Astana, Kazakhstan, June 29–30, 2017.
- [4] Берлин Е.М., Системы частотного управления синхронно-реактивными двигателями / Е.М. Берлин, Б.А. Егоров, В.Д. Кулик, И.С. Скосырев – Л.: Энергия, 1968. – 132 с.